

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Zproduktivnění elektrodrátového řezání

Rationalization Technology of Electrical Discharge Machining

Student:

Jaroslav Dušek

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student:

Jaroslav Dušek

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Zproduktivnění elektrodrátového řezání
Rationalization Technology of Electrical Discharge Machining

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Nekonvenční metody obrábění.
3. Možnosti zvýšení produktivity elektroerozivního obrábění.
4. Diskuze k experimentu.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] HAVRILA, M.; ZAJAC, J.; BRYCHTA, J.; JURKO, J. *Top trendy v obrábání, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [4] ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. *Top trendy v obrábání, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [5] VASILKO, K.; HAVRILA, M.; MARCINCIN-NOVÁK, J.; MÁDL, J.; ZAJAC, J. *Top trendy v obrábání, III. část – Technologie obrábění*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 214 s. ISBN 80-968954-2-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školního představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s opatřením užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákonů o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012

Jaroslav Dušek
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jaroslav Dušek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Jaroslav Dušek

Petrovice 67

563 01 Lanškroun

Místopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě21.5. 2012.....

.....Jaroslav Dušek.....
podpis studenta

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení a za pomoc při zpracování práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Luboši Kubíčkovi zaměstnanci firmy Fortell s.r.o. za pomoc při experimentu a poskytnutí literárních podkladů.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Dušek, J. Zproduktivnění elektrodrátového řezání: bakalářská práce. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012, vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Bakalářská práce byla realizována ve firmě Fortell s.r.o. Zabývá se porovnáním dvou obráběcích technologií na čtyři řezy a na pět řezů na stroji AgieScharmilles Cut 3000.

V první části práce popisují nekonvenční metody obrábění. Druhá část je zaměřená na porovnání obráběcích technologií, které jsou použity při výrobě střížných matic a následné zdokumentování výsledků. Na závěr bakalářské práce se posoudí produktivita těchto technologií a na výrobu se zvolí vhodnější.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Dušek, J. Rationalization Technology of Electrical Discharge Machining: bachelor thesis. Ostrava: VSB- Technical University Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Machining and Assembly, 2012, supervisor: prof. Ing. Vladimír Vrba, PhD.

Bachelor thesis was implemented in the company Fortell Ltd.. It deals with comparison of two machining technologies into four and five sections of the machine AgieScharmilles Cut 3000 th.

The theoretical part describes the unconventional methods of machining. The second part focuses on the comparison of machine technologies that are used in the manufacture of cutting dies. Afterwards, the results are documented. In conclusion of bachelor thesis, there will be assessed the productivity of these technologies and finally the appropriate production technology will be selected.

Obsah

Seznam použitých zkratk	9
1. Úvod	10
2. Obecná charakteristika daného problému	11
2.1 Historie a organizační struktura společnosti FORTELL s.r.o.	12
3. Nekonenční metody obrábění	14
3.1 Elektroerozivní obrábění	15
3.1.1 Elektrojiskrové obrábění	17
3.1.2 Elektroimpulsní obrábění	18
3.1.3 Elektrokotaktní obrábění	18
3.1.4 Anodomechanické obrábění	20
3.1.5 Elektroerozivní řezání drátovou elektrodou	21
3.1.6 Dielektrikum	24
3.2 Obrábění laserem	26
3.3 Obrábění plasmou	30
3.4 Obrábění iontovým paprskem	32
3.5 Obrábění paprskem elektronů	34
3.6 Elektrochemické obrábění	36
3.7 Chemické obrábění	39
3.8 Obrábění ultrazvukem	40
3.9 Obrábění vodním paprskem	42
3.10 Obrábění proudem brusiva	45
4. Možnosti zvýšení produktivity elektroerozivního obrábění	
4.1 Elektrodrátové řezání	46

4.2 Experiment	47
4.3 Seznámení se strojem	48
5. Diskuze k experimentu.....	49
5.1 Obrábění na čtyři řezy.....	49
5.2 Obrábění na pět řezů	51
5.3 Výpočet (4 řezy)	52
5.4 Výpočet (5 řezů)	53
6. Technicko – ekonomické zhodnocení, závěr	54
7. Seznam použité literatury.....	55

Seznam použitých zkratk

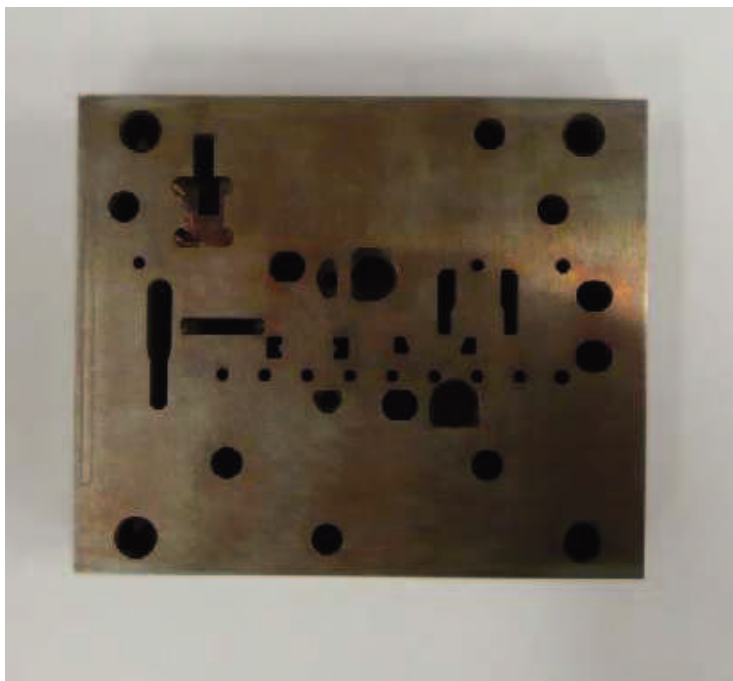
a	vzdálenost trysky od povrchu obrobku	mm
A_w	rychlost drátu	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
$d_{1\text{kg}}$	cena 1 kg drátu	Kč
$d_{\text{spotřeba}}$	cena spotřebovaného drátu	Kč
F	Faradayův náboj	$\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$
F_w	napětí drátu	MPa
G_{teo}	hmotnost látky	g
HRC	tvrdost materiálu podle Rockwella	-
I	proud	A
M	molární hmotnost	$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
$m_{1\text{m}}$	hmotnost 1 m drátu	kg
$m_{\text{cívka}}$	hmotnost cívky	kg
$m_{\text{spotřeba}}$	hmotnost spotřebovaného drátu	kg
Ofs	přídavek na konturu	μm
p	tlak výplachu	Ba
P	výkon	kW
Q_v	úběr materiálu ultrazvukem	$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
R_a	střední aritmetická úchylka profilu (drsnot povrchu)	μm
s	délka spotřebovaného drátu	m
$s_{\text{cívka}}$	délka drátu na cívce	m
SK	Slinutý karbid	-
Str	strategie rohů	μm
t	celkový čas řezání	s
v_p	průměrná rychlost drátu	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
v	rychlost řezání	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Z	mocenství	-

1. Úvod

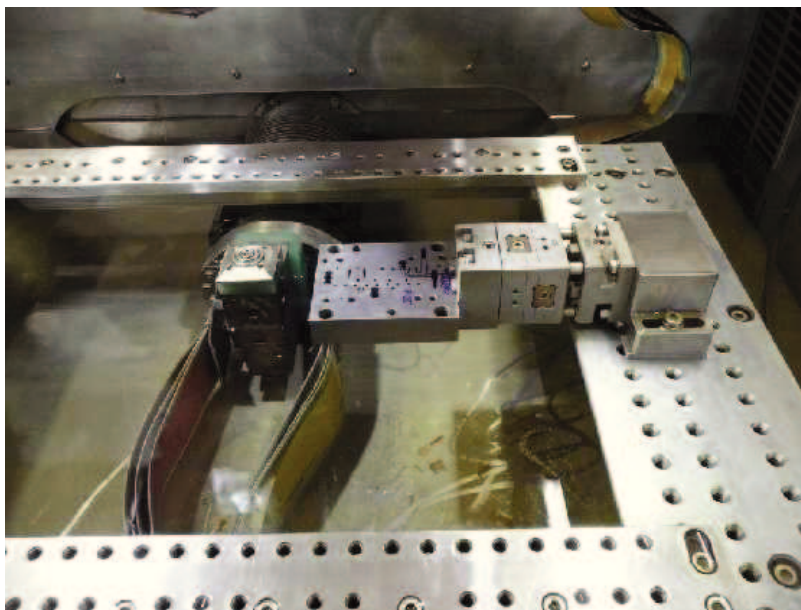
Rozhodující význam v hospodářství má strojírenství. Zajišťuje pro různá odvětví výrobní techniku (stroje). V dnešní době se vyrábějí hodně složité, přesné tvary součástí nástrojů z obtížně obrobitelných materiálů. Je kladen velký důraz na kvalitu výrobku, snížení nákladů a výrobní časy. Podíl mechanického obrábění ve strojírenství se relativně snížil a byl nahrazen obráběním založeným na elektrických, chemických nebo jiných fyzikálních principech (nekonvenční metody). Elektroeroze patří mezi nekonvenční metody, kterou používáme k výrobě střižných nástrojů, různých dílů do forem a podobně. Prvního jevu si všiml a zaznamenal elektroerozi v roce 1768 fyzik Priestley. V praxi tento jev byl použit mnohem déle sovětskými inženýry Lazarenkovými v letech 1938 – 1944 při obrábění elektricky vodivých těles. Začátek využívání metody se datuje kolem roku 1950 až 1954 [6] [11].

2. Obecná charakteristika daného problému

Bakalářská práce byla řešena ve společnosti Fortell s.r.o., kde se řešil hlavní úkol a to porovnání dvou obráběcích technologií elektrodrátového řezání na stroji značky AgieScharmilles Cut 3000. Po vyřezání střížné matrice oběma technologiemi, bylo provedeno vyhodnocení a posouzení.



Obr. 2 Střížná matrice



Obr. 2.1 Upnutí střížné matrice

2.1 Historie a organizační struktura společnosti FORTELL s.r.o.

Společnost Fortell s.r.o. byla založena v roce 1995 třemi pracovníky v Lanškrouně, kde sídlí dodnes. Počátečním předmětem činnosti byla konstrukce nástrojů, forem a obchodní činnost. Firma se postupně rozvíjela, vybudovala lisovnu kovů, lisovnu plastů a nástrojárnu. V dnešní době má 107 zaměstnanců. Je dodavatelem nástrojů, forem a dílů pro elektrotechnický, automobilový, zdravotnický a spotřební průmysl zejména pro tuzemský trh. Část produkce exportuje do zahraničí - Německa, Holandska, Velké Británie, Dánska, Švédska, Finska a dalších [10].

Cílem společnosti Fortell s.r.o. je poskytovat služby takovým způsobem, aby byly optimálně uspokojeny potřeby a požadavky stávajících a budoucích zákazníků. Na shodu, spolehlivost, bezpečnost výrobků, na kvalitu, cenu a v neposlední řadě na minimální dopady na životní prostředí [10].

V současné době jsou činnosti rozděleny následovně [10]:

Středisko 100

- obchodní činnost v oblasti nástrojů a forem, konstrukce těchto nástrojů a správa společnosti

Středisko 200

- lisování kovových dílů na lisovacích automatech TALO 25 a TPX 25

Středisko 300

- lisování kovových dílů na excentrických lisech řady LEN a LEK (Burkhardt STA 63/1000) o lisovací síle od 10 do 160 tun

Středisko 400

- *nástrojárna* – výroba forem na plast, zinek, hliník a nástrojů pro tváření kovů za studena, náhradních dílů
- disponuje CNC obráběcími centry (3 – osá vysokorychlostní obráběcí centra FIDIA HS664, obráběcí centra MCFV 1060NT a MCV 750A), elektroerozivními stroji (řezací stroje AgieCharmilles Cut 3000 a Agiecut Classic 2S, hloubící stroje Agietron Innovation 2 a na hloubení startovacích otvorů Agiedrill) a dalšími stroji na výrobu - frézky, soustruh, brusky naplocho

Středisko 500

- vstřikování plastických hmot

Technologie používané při výrobě forem:

- Unigraphics NX5
- PEPS V5.3.9



Obr. 2.1 Firma Fortell s.r.o. [10]

Společnost je držitelem certifikátu řízení jakosti dle norem ISO 9001 a certifikátu systému environmentálního řízení společnosti dle norem ČSN EN ISO 14001:2005.

3. Nekonvenční metody obrábění (NMO)

Nekonvenční metody jsou fyzikální technologie založeny na fyzikálních a chemických principech úběru materiálu. Bez těchto metod by byly určité druhy součástí pro výrobu velmi obtížné a neekonomické. Jsou to především tvarově složité součásti z těžko obrobitelných materiálů (např. zápustky, speciální nástrojové oceli, řezné nástroje ze slinutých karbidů (SK) atd.). Klasickým způsobem (konvenčním- CNC stroje,...) se těžko obráběly anebo vůbec nevyrobily. Může nastat, že konvenční způsoby jsou pro některé obrábění dílů málo produktivní, nevyhovující [2].

Nekonvenční metody se dělí do základních skupin [4]:

- **Oddělování materiálu elektro - tepelnými principy:**

1. Elektroerozivní obrábění (EDM)
2. Obrábění laserem (LBM)
3. Obrábění plasmou (PBM)
4. Obrábění iontovým paprskem (IBM)
5. Obrábění paprskem elektronů (EBM)

- **Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým principem:**

6. Elektrochemické obrábění (ECM)
7. Chemické obrábění (CHM)

- **Oddělování materiálu mechanickým principem:**

- Abrazivní obrábění:**

8. Obrábění ultrazvukem (USM)
9. Obrábění vodním paprskem (WSM)
10. Obrábění proudem brusiva (AJM)

Výhody metod [4]:

- obrobiteľnosť nezávisí na mechanických vlastnostiach ale na fyzikálnych
- bezsilové obrábění s minimálným tepelným zatížením obrobku
- výroba přesných miniaturních součástí

Nevýhody, nedostatky:

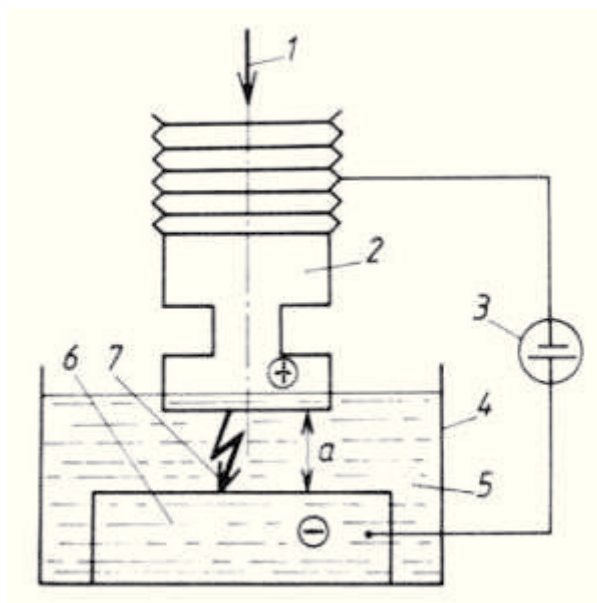
- malá produktivita
- vysoká energetická náročnosť

Důvody proč jsou na tyto metody čím dál větší nároky [4]:

- tvarová složitost součástí, střížných a tvářecích nástrojů, kokil pro tlakové lití
- řezné nástroje z rychlořezné oceli a slinutého karbidu
- konstrukce strojních součástí (zvyšování podílu těžkoobrobiteľných materiálů žárupevných, žáruvzdorných a vysokopevnostních)

3.1 Elektroerozivní obrábění

Základním principem elektroerozivního obrábění je elektrický výboj (elektroeroze), který probíhá a vzniká mezi dvěma vodivými elektrodami umístěnými v dielektrické kapalině. Účelem metody je opakovanými výboji na jedné elektrodě (obrobku) docílit maximálního úběru materiálu. Následně na druhé elektrodě (nástroji) co nejmenšího úbytku (obr. 3.1) [4].



1 – směr posuvu nástrojové elektrody

2 – nástrojová elektroda

3 – generátor

4 – pracovní vana

5 – tekuté dielektrikum

6 – obrobek

7 – elektrický výboj

Obr. 3.1 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [5]

Proces lze ovlivnit [4]:

- vhodným vybráním materiálu nástrojové elektrody
- způsob dodání energie – frekvencí (dobou), polaritou, zapojení obvodu
- volba pracovního prostředí – dielektrikum

Rozeznáváme dva druhy výbojů [4]:

- elektrickou jiskru
- elektrický výboj (impuls) – nestacionární výboj

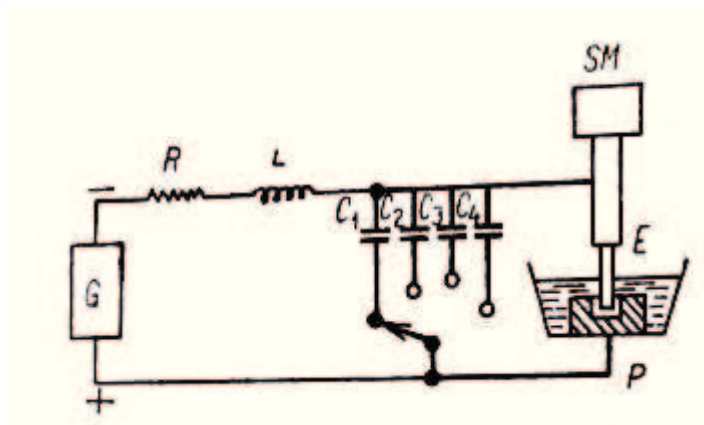
Elektrody se na začátku situace nacházejí ve vzdálenosti 1 až 500 μm . Zapojí se na zdroj stejnosměrného napětí s vnitřním odporem. Pracovní místo se zaplní dielektrickou kapalinou. V kapalině se uskutečňují tzv. před výbojové pochody. Pochody končí, když prorazí dielektrikum. V dalším stádiu jsou ukončeny elektrickým výbojem. Z obráběného obrobku se odtavují a zároveň zplyňují částice materiálu, kdy při výboji vznikají vysoké teploty, které atakují hranici 10000°C. Generátor nám udá trvání, působení i povahu výboje [2].

3.1.1 Elektrojiskrové obrábění

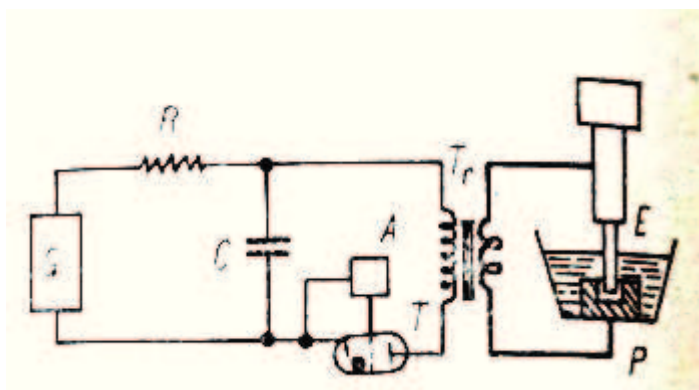
Povaha tohoto způsobu obrábění je krátká doba výboje (10^{-4} až 10^{-7} s) o vysoké frekvenci (0,1 až 200 kHz). Velký úbytek anody (obrobku), důsledkem elektronové vodivosti. Záporné elektrony způsobí dopadem na povrch vysokou koncentraci energie (10^5 až 10^7 W. mm $^{-2}$). Teplota může dosáhnout hranice 10000°C. Malou energii (10^{-5} až 10^{-1} J) vyvolá kratší doba trvání výbojů. To znamená malý úběr materiálu (malé krátery), drsnost povrchu R_a 0,8 – 0,2 μ m [4].

Zdroje impulsů - generátory RC (obr. 3.1.1) a RLC (obr. 3.1.1.1)

- podstata: opakované nabíjení kondenzátoru ze zdroje stejnosměrného napětí



Obr. 3.1.1 generátor RC [6]



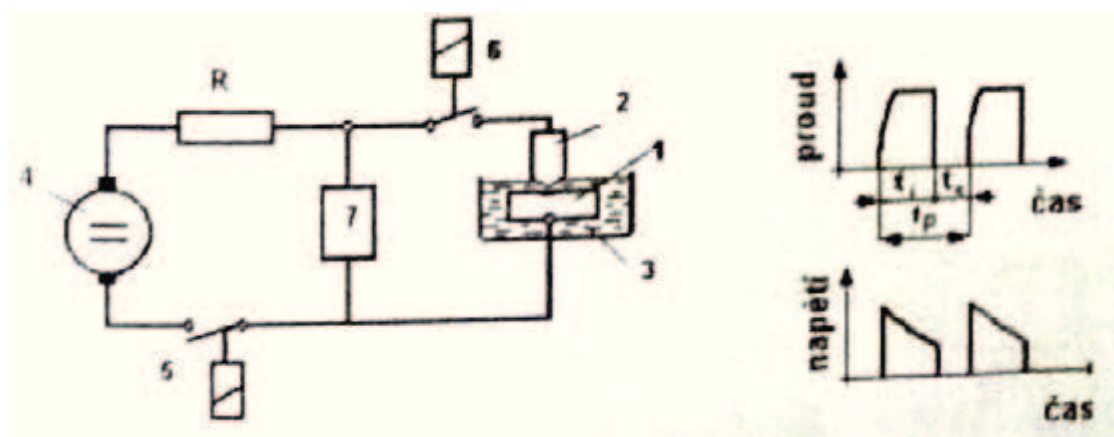
Obr. 3.1.1.1 generátor RLC [6]

3.1.2 Elektroimpulsní obrábění

Elektroimpulsivní metoda užívá energie krátkodobých obloukových impulsů (výbojů). Jejich doba trvání (10^{-3} až $5 \cdot 10^{-1}$ s) je delší, proto dovolují větší úběry [4].

- velikost energie výboje až 100 J
- větší intenzita elektrického proudu (až $1000 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$)
- napětí 20 až 100 V
- nižší frekvence výbojů, vznikají malé teploty 3500°C

Pro elektroerozivní obrábění užívají současná zařízení tranzistorové širokopásmové generátory. Čas impulsů 10^{-6} až 10^{-2} s, frekvence 0,4 až 500 kHz, proud 400 A [4].



Obr. 3.1.2 Schéma impulsního generátoru [4]

3.1.3 Elektrokontaktní obrábění

Podstatou elektrokontaktního obrábění je, že mezi dvěma elektrodami dochází ke kontaktu. Od elektrojiskrového obrábění se kontakt liší třemi zvláštnostmi [2]:

1. může být nepřetržitý nebo intervalový (tvorba obloukového výboje)
2. užívá střídavého proudu
3. změnou povrchu dotýkajících se elektrod se tvoří impuls

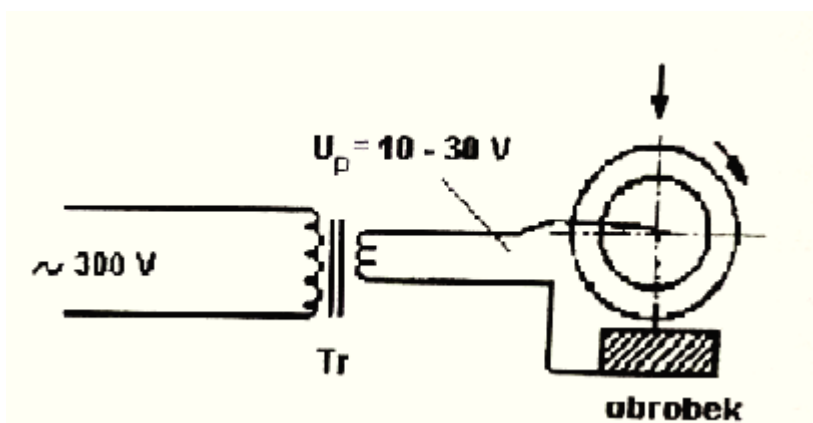
Na jiných místech povrchu elektrod dochází k dotyku, roztahuje se materiál, zvětšuje se odpor, uvolňuje se hodně tepla a přitom mezi nástrojem (elektroda) a obrobkem nastává krátkodobý oblouk. Rotační pohyb zajišťuje, aby se nepřivařily k sobě. Podmínkou je, aby se pohybovaly proti sobě. Kvůli těmto pohybům se na přerušovaných místech vytvářejí elektrické oblouky. Současně tímto pohybem se vytvářejí nové kontakty na jiných místech a také nové oblouky. Tlakové vlny vznikající od elektrických oblouků. Pokud jsou nevyhovující k odstraňování roztaveného materiálu, tak se musí zavést např. proud vody nebo stlačený vzduch [2].

Parametry zdroje (transformátor) [4]:

- střídavé napětí 10 až 30 V
- výkon 10 až 250 kW
- frekvence 50 až 500 Hz

Kotouč mívá obvodovou rychlost 20 až 60 m·s⁻¹, drsnost povrchu Ra= 6,3 μm.

Metoda určená především pro hrubování, řezání těžkoobrobitelných materiálů, vhodná pro větší rozměry obrobku (skrz deformace a kvůli přehřátí) [2].



Obr. 3.1.3 Schéma elektrokontaktního úběru [4]

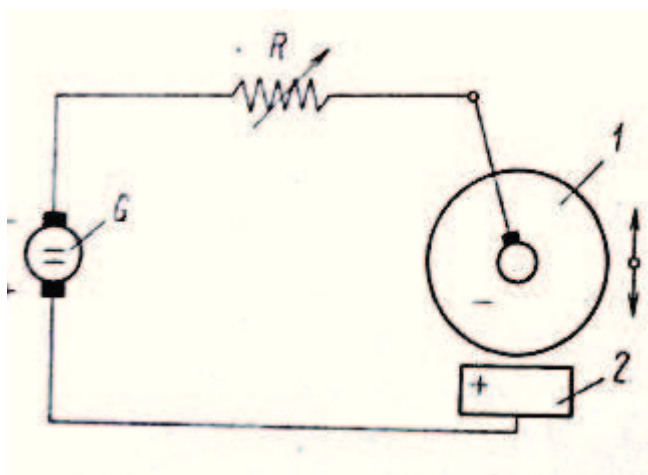
3.1.4 Anodomechanické obrábění

Anodomechanické obrábění pracuje za společnosti elektrokontaktního a elektrojiskrového úběru s úběrem elektrochemickým [4]. Na hladkém povrchu záporné elektrody (kotouče) je přitlačován silou obrobek, který je připojen na kladný pól. Při metodě se používá stejnosměrného proudu. Elektrolyt, přivádí se do místa, kde se nacházejí elektrody. Tvoří pasivační vrstvu, která brání přímému styku obrobku s nástrojem. Povrch kotouče odvádí porušený materiál ze součásti, který vznikl elektrickým obloukem a jiskrovým výbojem [2].

Obvodová rychlost kotouče bývá $8 \text{ až } 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pracovní napětí 12 až 24 V.

Použití technologie [2]:

- dělení houževnatých ocelí, kalených a cementovaných ocelí, nerezavějících ocelí
- k řezání tenkostěnných profilů



G - stejnosměrný zdroj

R - stavitelný odpor proudu

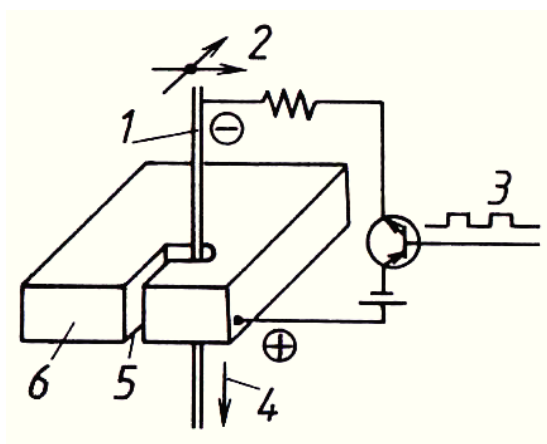
1 - ocelový kotouč (nástroj)

2 - obrobek

Obr. 3.1.4 Schéma anodomechanické pily [6]

3.1.5 Elektroerozivní řezání drátovou elektrodou

Drátovou nástrojovou elektrodu tvoří tenký drát, odvíjí se za pomoci speciálního zařízení, aby nedocházelo k místnímu opotřebení drátu, tím pádem k zhoršení přesnosti rozměrů. Mezi drátovou elektrodou a obrobkem se vytvářejí elektrické výboje a ty způsobují pracovní mezeru, daný tvar i rozměr [4]. Toto obrábění nám dovoluje vyrábět tvarové přímkové plochy (tvořící čarou těchto ploch je **přímka**) [8].



Obr. 3.1.5 Princip elektroerozivního řezání drátovou elektrodou [8]

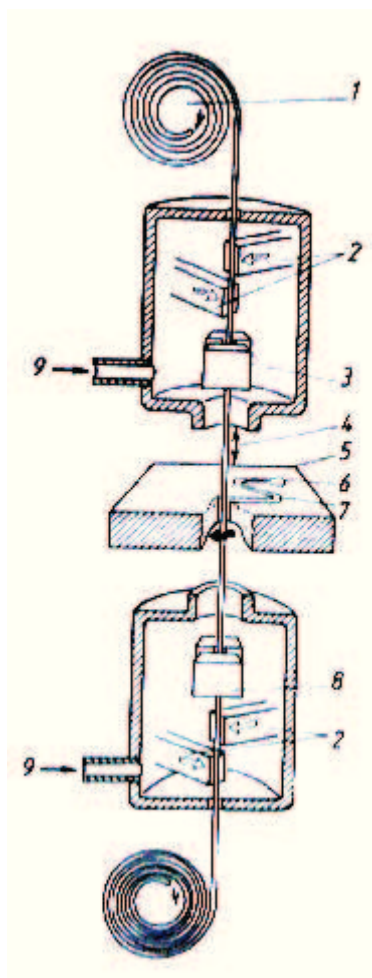
1 – drátová elektroda, 2 – CNC řídicí systém, 3 – generátor, 4 – směr posuvu elektrody, 5 – vyřezaná drážka, 6 – obrobek

Drátová elektroda je buď měděná, na větší průměry mosazná a na velmi jemné řezy molybdenová (průměr drátu 0,03 – 0,07 mm). Pro přesné obrábění složitých tvarů, používáme nástrojovou elektrodu, tvořenou drátem, který může odebírat materiál v každém směru. Celý proces nám umožňuje provádět CNC řídicí systém [8].

Drát musí splňovat požadavky [4]:

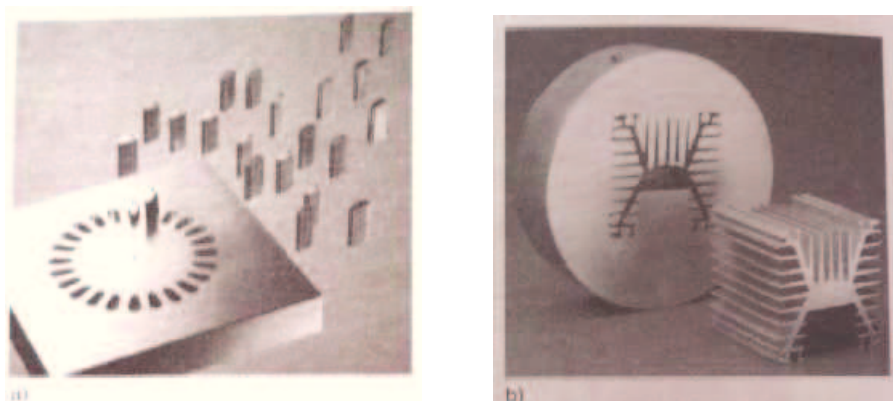
- vysoká elektrická vodivost
- dostatečná mechanická pevnost
- úzké tolerance rozměrů (průměr) a tvaru (kruhovitost)

Aby vyřezaný tvar měl požadovanou přesnost je dáno vlastnostmi stroje, spolehlivostí a přesností CNC řídicího systému, čištění dielektrika. Je zapotřebí, aby drát do místa řezání vstupoval dokonale napnutý a vyrovnaný. Napínání a vedení drátu nám zaručuje systém vedení a podávání (obr. 3.1.5.1). Naklopení drátové elektrody vzhledem ke kolmé ose v rozsahu $\pm 30^\circ$ zajišťuje systém vedení a podávání [8].



- 1 – zásobník drátu*
- 2 – přívod výbojového proudu*
- 3 – horní vedení drátu*
- 4 – napínání drátu*
- 5 – obrobek*
- 6 – startovací díra*
- 7 – řezaný tvar*
- 8 – dolní vedení drátu*
- 9 – přívod dielektrika*

Obr. 3.1.5.1 Schéma podávání a vedení drátové elektrody [8]



Obr. 3.1.5.2 Příklady výrobků vyřezaných drátovou elektrodou [8]

Dosahované parametry [8]:

- maximální úběr materiálu $35 \text{ až } 200 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$
- jakost obrobeného povrchu $R_a = 0,15 \text{ až } 0,3 \text{ } \mu\text{m}$
- maximální tloušťka řezaného materiálu je 350 mm
- rovnoběžnost řezu do $2 \text{ } \mu\text{m}$ na 100 mm tloušťky materiálu
- přesnost tvaru a rozměru obrobeného povrchu závisí na tepelné stabilizaci stroje:
 - při kolísání teploty $\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ je přesnost $\pm 3 \text{ } \mu\text{m}$
 - při kolísání teploty $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ je přesnost $\pm 1 \text{ } \mu\text{m}$



Obr. 3.1.5.3 Foto drátové řezačky AgieCharmilles CUT 3000

3.1.6 Dielektrikum

Je zapotřebí věnovat pozornost při volbě dielektrické kapaliny, která má značný vliv na celý erozivní proces [6].

Požadavky na kapalinu [8] [6]:

- 1) určitá průbojnost, zajistí dostatečný odpor mezi katodou (drát) a anodou (obrobek)
- 2) musí mít malou viskozitu a dobrou smáčivost
- 3) chemicky neutrální k zamezení koroze
- 4) nesmí vznikat zápach a jedovaté plyny
- 5) hygienická a ekologická nezávadnost a nízká cena

Dielektrikum má tyto funkce [8]:

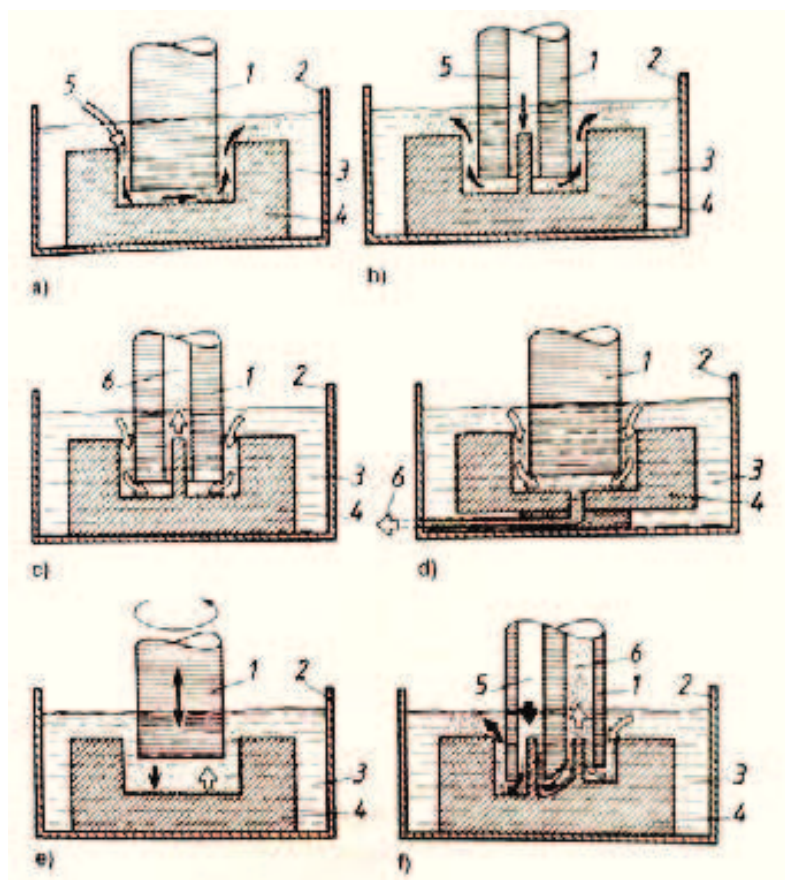
- působit jako izolátor mezi elektrodami
- důležité je odvádět teplo z pracovního prostředí
- odstraňovat odebraný materiál z místa výboje
- ohraničovat místo výboje (výbojový kanál)

Druhy kapaliny, které se používají:

- strojní olej
- transformátorový olej
- petrolej
- destilovaná voda
- deionizovaná voda

Dielektrikum se odvádí z pracovního prostoru do zařízení, kde se provádí čištění, chlazení kapaliny. Hlavním úkolem zařízení je očistit dielektrikum od nečistot, které vznikly při obrábění.

Druhy vyplachování neboli přívod dielektrika mezi nástrojovou elektrodou a obrobek [8]:



Obr. 3.1.6 Přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu – vyplachování [8]

a) vnější, b) tlakové vnitřní, c), d) odsáváním, e) pulzní, f) kombinované

1 – nástrojová elektroda, 2 – pracovní vana, 3 – dielektrikum, 4 – obrobek, 5 – přívod dielektrika, 6 – odsávání dielektrika

3.2 Obrábění laserem

Mezi novodobé technologie v obrábění patří produktivní laserová technologie se značnými rozdíly v kvalitě, stabilitě, spolehlivosti i pružnosti řezacích systémů. Na žádané kvalitě řezu, na materiálu, geometrii, tvaru závisí správný výběr laseru [2].

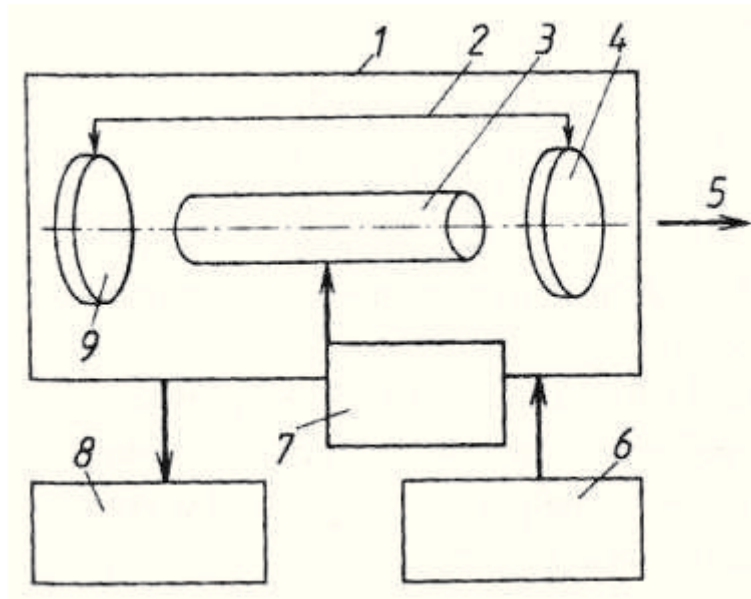
Základní princip stylu obrábění laserem představuje soustředění energie elektromagnetického záření jasného světla na malou plochu obrobku. Energie přístroje, která se přeměnila na energii tepelnou, se v místě dotyku obrobku velice zahřeje. Teplota přesahuje teplotu tavení obráběného materiálu. V místě dotyku se odpařuje i taví [2].

Slovo **laser** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je sestavený z prvních písmen anglických slov. Překlad hovoří o zesilovači, zesílení světla pomocí vynucené emise záření, neboli o zdroji svazků paprsků světla o značné intenzitě [2].

Princip metody (laseru)

Laser pracuje na principu uvolňování potenciální energie elektronů atomu prvku. Nachází se v základní hmotě laseru. Jeho obsah není velký. Je nositelem zesílení světelných paprsků. Ty jsou až 100000 krát větší než světlo, kterým byl ozářen [2].

Zařízení pro obrábění laserem



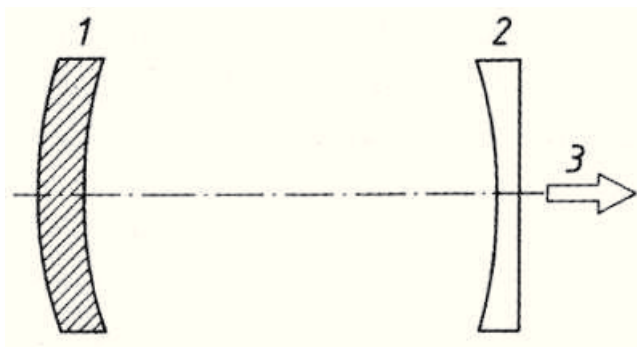
Obr. 3.2.2 Schéma zařízení pro obrábění laserem [1]

Laser se skládá [1]:

- laserová hlavice (1)
- laserové médium (3)
 - médium se může nacházet v plynném, tekutém nebo pevném stavu
 - stanovuje délku vlny záření
- rezonátor (2)
 - optický systém, který může zformovat a zesílit záření - vlny elektromagnetické
 - představuje minimálně dvě zrcadla:
 1. sférická zrcadla v konfokálním stabilním uspořádání (obr. 2.2a)
 2. sférická zrcadla v konfokálním nestabilním uspořádání (obr. 2.2b)
 - velikost a tvar zrcadel stanovují divergenci paprsku (intenzita záření, energetická rozbíhavost záření), která je dána prostorovým, rovinným úhlem, ve kterém se šíří

- budící zařízení (7)
 - ovlivňuje pracovní režim laseru
 - buzení stanovuje laserové médium
 - buzení:
 - a) plynné médium elektrickým výbojem, stejnosměrným, střídavým proudem
 - b) pevné médium výbojkami nebo diodami
- zdroj energie buzení (6)
 - síťový napáječ
- chladicí systém (8)
 - nejvíce se u laserů používá při zpracování materiálu chlazení vodou
 - úkolem systému je odvádět nezpracovanou energii, která se nezmění na záření ale v tepelnou energii
 - okruh má dvě větve:
 - a) vnitřní- deionizovaná voda
 - b) vnější- voda z vodovodní sítě
- polopropustné zrcadlo (4)
- výstup paprsku (5)
- nepropustné zrcadlo (9)

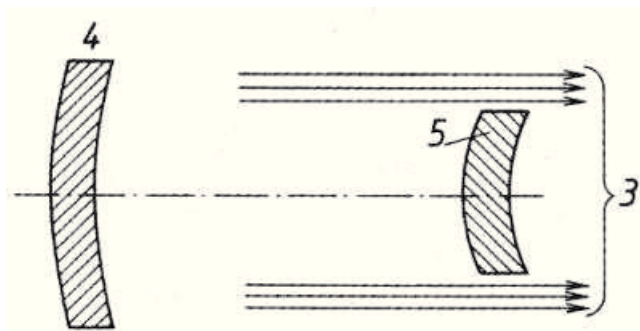
*a) konfokální stabilní: 1- nepropustné zrcadlo, 2- polopropustné zrcadlo,
3- výstupní zařízení*



Obr. 3.2.2a Uspořádání zrcadel optického rezonátoru [1]

b) *konfokální nestabilní*: 3- výstupní zařízení, 4- zadní zrcadlo,

5- přední zrcadlo

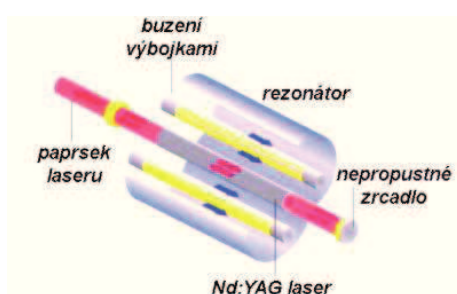


Obr. 3.2.2b Uspořádání zrcadel optického rezonátoru [1]

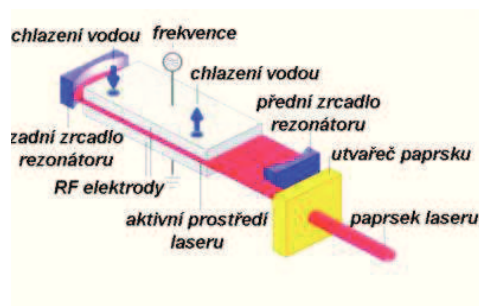
Druhy laseru

Dělí se podle [1]:

- *aktivního prostředí* – pevnolátkové (obr. 3.2.2c), plynové (obr. 3.2.2d), polovodičové, kapalinové, plazmatické
- *vlnových délek optického záření* - infračervené, ultrafialové, rentgenové
- *typu energetických hladin* - elektronové, jaderné, molekulární
- *časového režimu provozu laseru* - impulzní, kontinuální
- *délky generovaného pulzu* - s dlouhými, krátkými nebo s velmi krátkými pulzy



Obr. 3.2.2c laser Nd: YAG [1]



Obr. 3.2.2d laser CO₂ [1]

Mezi výhody při obrábění laserem patří [3]:

- vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálu
- řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, ostroúhlých tvarů, výroba komplexních obrysových dílů
- pravoúhlá řezná hrana
- velice dobrá automatizace
- velmi malé přivedené teplo, žádné deformace obráběného předmětu
- velmi malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm)
- vysoká řezná rychlost u tenkých materiálů

Mezi nevýhody při obrábění laserem patří [3]:

- vysoké investiční a provozní náklady (vysoká spotřeba plynů)
- omezení tloušťky materiálu:
konstrukční ocel: 20 (25) mm
vysokolegovaná ocel: 15 mm
hliník: 10 mm
- u středně tlustých materiálů žádná přímá hladká řezná plocha
- nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku
- omezení stability paprsku u řezání konstrukční oceli s normálním obsahem křemíku a fosforu
- snížení stability procesu u řezání lesknoucích se povrchů materiálu
- menší účinnost (CO₂-laser max. 10%)

3.3 Obrábění plazmou

Obrábění pomocí paprsku funguje za vysokých teplot, které se pohybují od 16000 do 20000 °C. Jednotlivé částice kovu se buď odtavují, nebo velkou rychlostí odpařují. Opracovávaný materiál se tím značně nezahřívá a teplo neproniká do větších hloubek. Teplotou ovlivněná vrstva bývá od 0,3 do 1 mm [2].

Zařízení, které je potřeba k výrobě plazmy, se nazývá plazmová pistole. Mezi anodou (obrobek) a katodou (elektroda v pistoli) vzniká elektrický oblouk, který je potřebný k výrobě plazmy. Při obrábění plazmou je možnost kombinovat s obráběním řeznými nástroji např. soustruhem [2]. S plazmou dovedeme řezat mosaz, hliník, měď, nerez, všechny druhy oceli. Dovoluje maximální tloušťku 45 mm a minimální 1 mm [3].

V **plazmovém hořáku** se přeměňuje elektrická energie na tepelnou energii usměrněného proudu plazmy. Hořák patří mezi základní součást [8].

Druhy hořáků [8]:

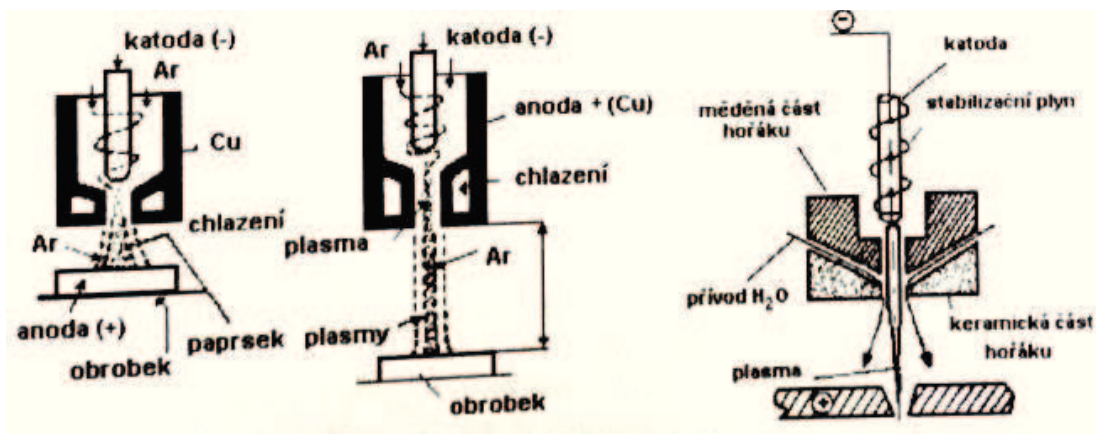
- plazmové hořáky s plynou stabilizací
- plazmové hořáky s vodní stabilizací
- plazmové plyny
- fokusační plyny
- asistentní plyny

Mezi výhody při obrábění plazmou patří [3]:

- provoz jednoho a více hořáků podle série
- řezání všech elektricky vodivých materiálů
- bez alternativy při řezání vysokolegovaných ocelí a hliníkových materiálů ve střední a větší tloušťce
- řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem
- řezná rychlost až 10x vyšší než autogenní
- velice dobrá automatizace
- malý hluk na pracovišti a velmi malé teplotní ovlivnění řezaného materiálu pod vodou

Mezi nevýhody při obrábění plazmou patří [3]:

- omezení použití do 160 mm u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou
- širší řezná štěrbina



Obr. 3.3 Schéma typů plazmových hořáků [4]

3.4 Obrábění iontovým paprskem

Tato nekonvenční metoda se zajímá o odstraňování atomu z povrchu obrobku přenosem hybnosti povrchu. Je ničen energetickými ionty. V dnešní době se tato technologie obrábění velmi rychle rozšířila v rozvoji výroby integrovaných obvodů a polovodičů. Pro zintenzivnění výroby polovodičů a integrovaných obvodů se dnes užívá metoda obrábění pomocí iontových paprsků, kterých se používá při vytváření matric při výrobě a dále při hlazení a čištění povrchu [2].

Přes krycí masku se uskutečňuje obrábění paprskem, ve které je vytvořen tvar obráběné plochy obrobku. U chemického obrábění probíhá proces podobně. Iontový paprsek obrábí rychlostí $0,7$ až $1,5 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$. Zdrojem iontů bývá argon [8].

Mezi výhody obrábění iontovým paprskem patří [2]:

- tato metoda dovoluje obrábět téměř všechny materiály
- vyšší hodnota úběru
- metodu lze plně kontrolovat a přesnost je menší než 100 nm
- dobrá kontrola rozptylu paprsku
- povrch obrobku velmi kvalitní i kolmost stěn drážek po obrobení

Mezi nevýhody obrábění iontovým paprskem patří [2]:

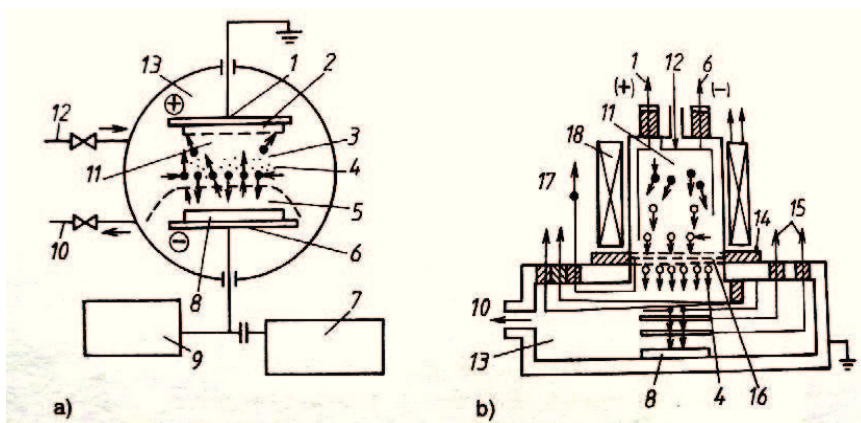
- nutné provedení metody ve vakuu
- vysoká cena potřebného zařízení

Využití v průmyslu

Při provádění iontovým paprskem obrábění nemá svůj referenční povrch. Technologie řezání, broušení, leštění a lapování ho mají. Pod referenčním povrchem si představíme vzorovací holografickou masku nebo předběžný tvar. Realizace operace se provádí přímým působením iontového paprsku na připraveném tvaru dílu [2].

Technologie iontového paprsku [2]

- **implantační** - metoda, která se zabývá povrchovým zušlechťováním, při kterém se mění jak chemické složení, tak struktura vrstvy
- **naprašování** - slouží pro nanášení vrstvy atomu na povrch součásti
- **frézování** - přes ochrannou masku mělkých přesných drážek
- **strukturování** - použití u zvětšování povrchu kondenzátorů, strukturování povrchu fluoropolymerů



Obr. 3.4.3.1 a)b) Schéma iontového obráběcího zařízení [8]

a) anizotropní leptání polovodičů

b) iontové leptání

3.5 Obrábění paprskem elektronů

Princip metody obrábění pomocí paprsků elektronů je založen na užití energie paprsků, které se soustředí na malou plochu obrobku. Energie kinetická se mění na tepelnou. Následně dochází k odpařování a tavení materiálu. K tomu dochází v místě dotyku [2]. Paprsek má za úkol vyvolat chemickou reakci, použití na výrobu elektronických prvků [4].

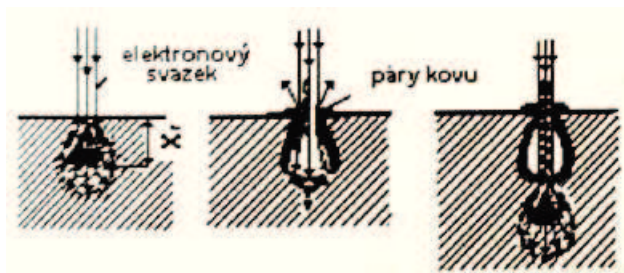
Technologii elektronového paprsku je možno rozdělit na dva druhy [4] [7]:

1. netermické procesy

- paprsek má za úkol vyvolávat chemické reakce
- užití v elektrotechnice, výroba čipů

2. termické procesy

- mezi ně patří např. vrtání velkých počtů malých děr
- proces se uskutečňuje pomocí elektronového paprsku při tepelné energii větší než $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

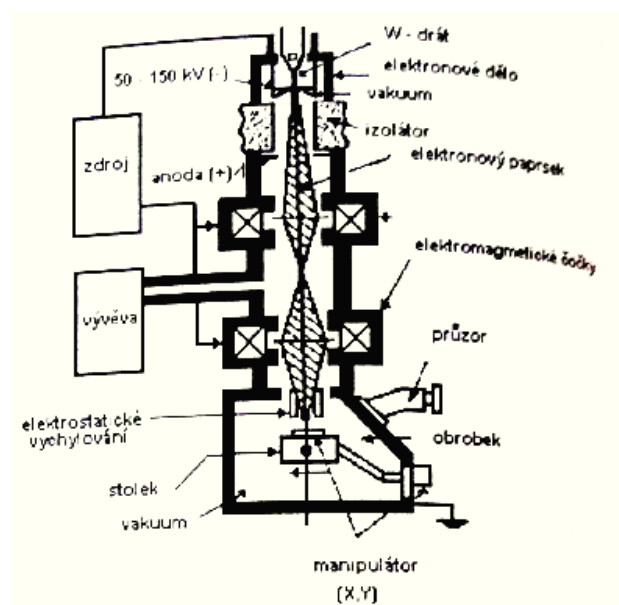


Obr. 3.5 Schéma vrtání EBM [4]

Elektronové dělo je zařízení (obr. 3.5.1), které umožní obrábění pomocí paprsku. Je základem strojů a slouží k urychlení, generování, zaostření svazku elektronů.

Elektronové dělo se používá:

- obrábění těžkoobrobitelných materiálů (keramika, tvrdé slitiny, drahokamy, tantal, titan)



Obr. 3.5.1 Schéma elektronového děla [4]

3.6 Elektrochemické obrábění

Elektrochemické obrábění se značí zkratkou EC. Patří mezi beztržiskové metody obrábění elektricky vodivých materiálů. Materiál je odebírán elektrolýzou, která se uskutečňuje jako anodické rozpouštění. Stejnosměrný proud prochází elektrolytem, obráběná anoda (plocha) se rozpouští a tvar katody (nástroje) se vytvarovává do obrobku [4].

Elektrolyt – kapalný vodič, je základem tohoto velmi progresivního obrábění, kdy se využívá poznatků o působení elektrického proudu. Tento fyzikální jev v roce 1834 teoreticky propracoval, zdůvodnil Faraday a je označován jako elektrolýza [4].

Elektrolyty jsou zpravidla vodní roztoky solí (chlorid sodný, chlorid draselný, nitrid sodný). Existují i speciální elektrolyty např. aktivní kyselina, zásady. V mezeře, která se nachází mezi nástrojem a obrobkem proudí rychlostí 30 až 60 m·s⁻¹. Rozměr mezery bývá mezi 0,025 až 1,3 mm. Teplota elektrolytu od 24°C do 65°C. Velikost stejnosměrného proudu se pohybuje mezi 50 až 20 000 A, jeho proudová hustota 0,2 až 3 A·mm⁻² a napětí 30 V. Nachází se v mezeře [9].

Hlavní úkoly elektrolytu [8]:

- vedení elektrického proudu
- určovat podmínky rozpouštění anody
- z pracovního prostoru odvádět teplo
- zajištění odvodu odpadu, který vznikl chemickou reakcí

Touto metodou je možno obrábět různé součásti včetně těch, které nejdou standardními způsoby. Jde o tvarové plochy, hluboké díry a o tvrdé materiály jako je kalená ocel. Uplatnění najdou při výrobě turbín a v kosmickém průmyslu [9].

Hlavní zákonitosti elektrochemického obrábění jsou [8]:

- Faradayovy zákony (2 zákony)
- teorie elektrolytů
- termodynamika galvanických článků

Jinou možností jak formulovat Faradayovy zákony než pomocí zákonů je podle rovnice:

$$G_{teo} = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{Z} \cdot I \cdot t \quad (g)$$

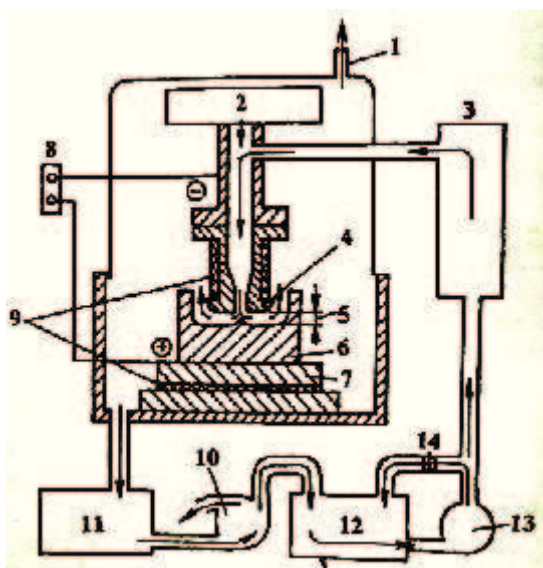
G_{teo} - hmotnost látky, která se rozpustí, vyloučí, oxiduje za působení proudu intenzity I (A) po dobu t (s)

F - Faradayův náboj, je ho zapotřebí k realizaci elektrochemické reakce jednoho molu:

$$F = 96\,487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

M - molární hmotnost látky ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)

Z - mocenství, ve kterém kov přechází do roztoku



Obr. 3.6 Princip elektrochemického obrábění [9]

Způsoby EC obrábění [4]

Dělíme je podle:

- způsobu odstraňování produktů anodových reakcí (pasivace)
- intenzity úběru materiálu

Způsoby:

1. EC obrábění s nuceným odstraňováním produktů pasivace

a) obrábění s proudícím elektrolytem

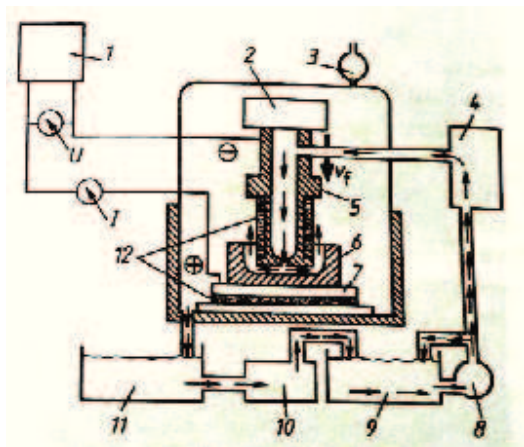
- EC hloubení tvarů a dutin (obr. 3.6.1)
- EC hloubení otvorů malých průměrů
- EC odstraňování otřepů
- EC dělení materiálů

b) obrábění s mechanickým odstraňováním produktů reakcí (anodomechanické)

- EC broušení a lapování
- EC honování

2. EC povrchové obrábění bez odstraňování produktů reakcí

- EC leštění
- EC povrchové značení



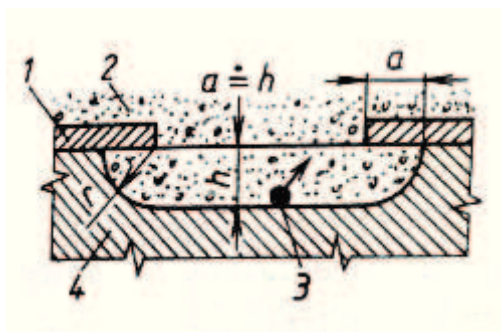
Obr. 3.6.1 Schéma zařízení pro hloubení dutin [8]

3.7 Chemické obrábění

Chemické obrábění se zabývá odleptáváním vrstev materiálu z povrchu obrobku. Je založeno na chemické reakci obráběného materiálu. Vrstvy se pohybují v tloušťkách od několika setin milimetrů do několika milimetrů. Mezi nejpoužívanější pracovní prostředí patří kyselina nebo hydroxid [9]. Speciální lak neboli masku používáme na zakrytí těch míst, které nemají být obrobny. Tloušťky laku nanášených ve vrstvách se pohybují mezi 0,15 až 2 mm. Mezi užívané obráběné materiály patří hliník a jeho slitiny, konstrukční uhlíkové oceli, mosaz, měď, titan [8].

Mezi chemické leptání patří:

- chemické rozměrové leptání (chemické frézování)
- chemické prostřihování



1 – maska

2 – nástroj (chemická leptací látka)

3 – odleptané částice materiálu obrobku

4 – obrobek

Obr. 3.7 Princip chemického obrábění [8]

Použití [8]:

- výroba mělkých, několik setin milimetrů hlubokých, tvarově složitých reliefů
- úběr velkých ploch do malých tlouštěk a složitých tvarů
- obrábění tenkostěnných součástí – nedochází k deformaci obrobku
- obrábění tvarově složitých a málo tuhých součástí
- výroba děr do tenkostěnných trubek a fólií

Pracovní parametry [8]:

- rychlost leptání - $0,01$ až $0,4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- maximální doba leptání - 8 až 10 hodin
- maximální hloubka leptání - do 10 mm

3.8 Obrábění ultrazvukem

Základem abrazivní metody je obrábění tvrdých a křehkých materiálů, které vychází z řízeného rozrušování obráběcího materiálu účinkem úderů abrazivních zrn. Zrna se nacházejí mezi nástrojem a obráběným povrchem, které jsou rozkmitána na ultrazvukové frekvenci 18 až 25 kHz ve směru podélném. Jsou nástrojem přitlačována stálou silou k obrobku, čímž dochází k překopírování tvaru nástroje do obrobku [4].

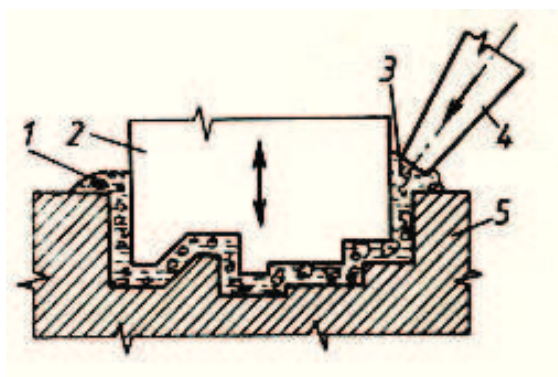
Obrábění se uplatňuje ve dvou variantách [9]:

- ultrazvukové nárazové broušení
- rotační obrábění ultrazvukem

Při použití vody se dosahuje nejlepších výsledků. Jako brusivo (zrna) je určeno karbid bóru, karbid křemíku, elektrokorund. V závislosti na tvrdosti materialu je koncentrace brusných zrn v kapalinách 30 až 40% . Sklo, křemík, keramika, grafit a slinutý karbid se obrábí za pomoci ultrazvukového nárazového broušení [9]. Materiál, z kterého se zhotovují nástroje pro obrábění, je ocel, měď i mosazi. Ultrazvuk se dále upotřebí např. u tepelného zpracování, pokovování, čištění. Produktivitu této metody hodnotíme podle úběru $Q_v [\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$ a rychlostí vnikání nástroje do materiálu [4].

Dosahované parametry [8]:

- obrobiteľnosť materiálov ultrazvukem je úmerná jejich krehkosti a tvrdosti
- presnosť obrábění
 - průchozí díry do hloubky 3 mm 0,02 až 0,05 mm na průměr
 - plochy o velikosti 40 až 50 mm² 0,02 až 0,05 mm
 - neprůchozích dutin 0,05 až 0,1 mm
 - kuželovitost děr cca 20' na 1 mm délky díry
- kvalita obráběné plochy
 - Ra = 1,6 až 0,4 μm
- zrnitost brusiva se volí
 - pro hrubování 3 až 16
 - pro dokončování 70 až 120
 - pro velmi přesné obrábění 220 až 360 (mikroprášky)



1 – kapalina

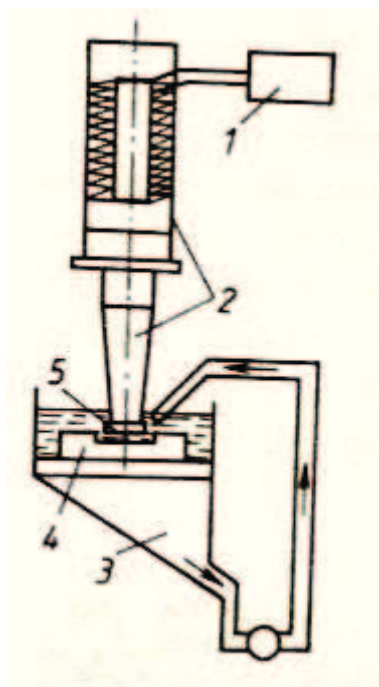
2 – nástroj

3 – brousící zrna

4 – přívod brousících zrn a kapaliny

5 – obrobek

Obr. 3.8 Princip obrábění ultrazvukem [8]



- 1 – generátor ultrazvukových kmitů*
- 2 – systém pro vytvoření mechanických kmitů*
- 3 – přívod brousících zrn a kapaliny*
- 4 – obrobek*
- 5 – nástroj*

Obr. 3.8.2 Stroj pro obrábění ultrazvukem [8]

3.9 Obrábění vodním paprskem

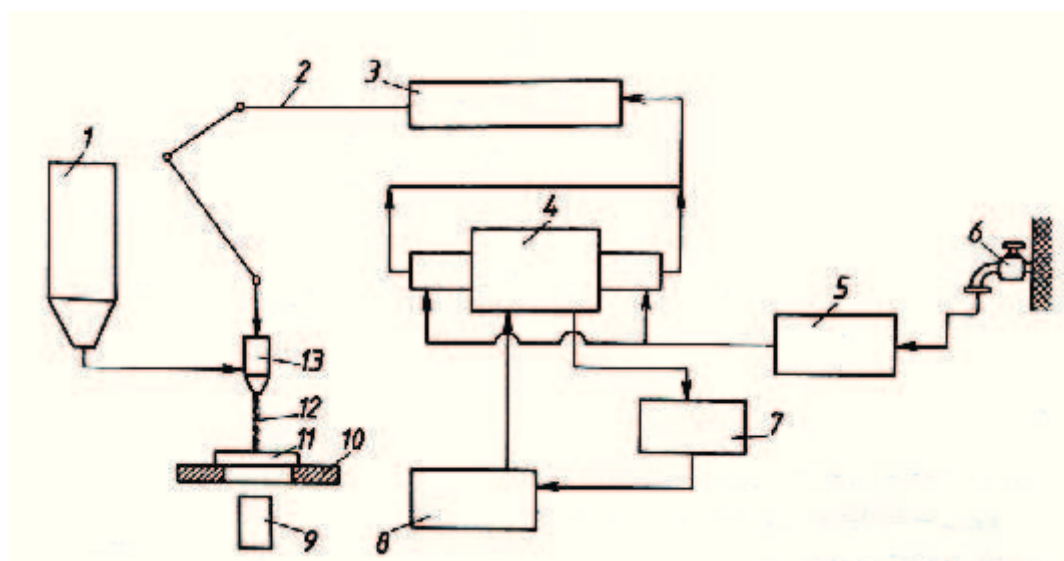
Podstatou metody je přeměňování kinetické energie na mechanickou, za působení kavitační koroze. Při vzniku bublin v kapalině, které jsou naplněné párou, vznikají při jejich zániku rázy. Rázy způsobí vytrhávání částic materiálu z povrchu součásti – *kavitační koroze* [8]. Paprsek vody je řezným nástrojem o vysoké rychlosti a tlaku, s kterým se řezou různé druhy materiálů. Pro řezání materiálů se v praxi používá buď *čistého vodního paprsku*, nebo *vodního paprsku s abrazivní příměsí* [9]. Do paprsku se přidávají zrna brousícího materiálu – zrna křemičitého písku, granátu, olivínu o velikosti 0,2 až 0,5 mm. Podle řezaného materiálu se volí vhodná pracovní kapalina. Jedná se většinou o vodu (čistou a chemicky neupravenou), dále lze použít olej, při řezání cukrářských výrobků kakao [8].

Čistého vodního paprsku se využívá především pro řezání nekovových materiálů (lamináty, grafitové kompozity, sklotextil, gumotextil). Rychlost řezání se pohybuje $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (lamináty) až $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (papír, lepenky).

Vodní paprsek s abrazivní příměsí se používá pro řezání velmi tvrdých a tvrdých materiálů. Rychlost od $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (titan, kobalt, SK) až do $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (sklo, hliník, kompozity) [9].

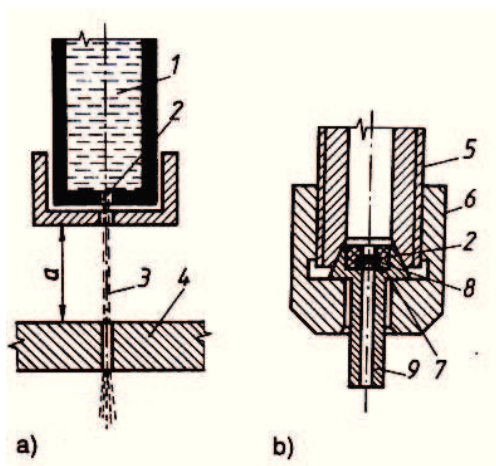
Výhody paprsků [9]:

- nedochází ke zpevňování materiálu a k ohřevu
- netvoří se při řezání prach
- více směrné řezání s nulovým poloměrem zaoblení
- nemusí se předem vyvrtat díra před opracováním tvaru



Obr. 3.9 Schéma stroje pro řezání kapalinovým paprskem [8]

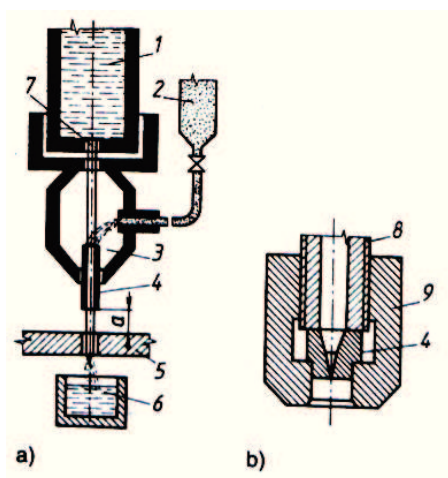
1 – zásobník brousících zrn, 2 – vysokotlaké potrubí, 3 – zásobník tlakové kapaliny, 4 – vysokotlaké čerpadlo, 5 – filtry, 6 – přívod pracovní kapaliny, 7 – nádrž oleje, 8 – nízkotlaké čerpadlo, 9 – lapač, 10 – pracovní stůl, 11 – obrobek, 12 – kapalinový paprsek, 13 – pracovní řezací hlava



Obr. 3.9.1 Pracovní řezací hlava pro čistý kapalinový paprsek [8]

a) schéma, b) provedení výstupní safírové trysky

1 – tlaková kapalina, 2 – výstupní tryska, 3 – kapalinový paprsek, 4 – obrobek, 5 – potrubí, 6 – matice, 7 – lůžko trysky, 8 – držák trysky. 9 – stabilizátor proudu kapalinového paprsku, a – vzdálenost trysky od povrchu obrobku



Obr. 3.9.2 Pracovní řezací hlava pro abrazivní kapalinový paprsek [8]

a) schéma, b) provedení výstupní řezací trysky

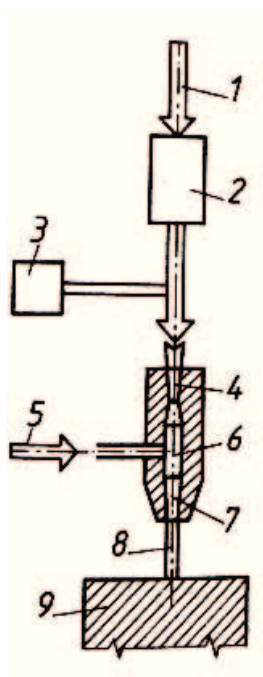
1 – tlaková kapalina, 2 – zásobník brousících zrn, 3 – směšovací komora, 4 – výstupní řezací tryska, 5 – obrobek, 6 – lapač, 7 – vodní safírová tryska, 8 – potrubí, 9 – matice, a – vzdálenost trysky od povrchu obrobku

3.10 Obrábění proudem brusiva

Metoda abrazivního účinku brusiva unášeného vzdušným proudem o vysoké rychlosti se používá k odstraňování materiálu. Využívá se k výrobě drážek a rýh v oblasti elektrotechnického průmyslu např. výroba polovodičů, pro odstraňování otřepů např. chirurgické jehly, hydraulické ventily [4].

Pracovní parametry [8]:

- pracovní tlak 5 MPa
- brousící zrna z oxidu hliníku nebo karbidu křemíku, velikost zrn $60\text{ }\mu\text{m}$
- rychlost obrábění nepřesahuje hodnotu $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
- pracovní tryska má vzdálenost od povrchu obrobku 10 mm
- rychlost úběru se pohybuje maximálně $10\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$
- tryska má výstupní průměr díry 3,5 mm a je vyrobená ze slinutého karbidu, z keramiky popřípadě safíru



1 – přívod vzduchu, 2 – kompresor, 3 – senzor pro řízení tlaku vzduchu, 4 – vstupní vzduchová tryska, 5 – přívod brousících zrn 6 – směšovací komora, 7 – výstupní tryska, 8 – proud vzduchu a brousících zrn, 9 – obrobek

Obr. 3.10 Schéma zařízení pro obrábění proudem brusiva [8]

4. Možnosti zvýšení produktivity elektroerozivního obrábění

4.1 Elektrodrátové řezání

1) Jednou z možností jak zvýšit produktivitu drátového řezání je upnutí více dílců do pracovní části stroje. Tím se zkracují upínací, rovnací, najížděcí a nakonec řezací časy.

2) Druhou teoretickou možností je zvýšení parametrů např.:

- proudu **I** [A]
- výkonu **P** [kW]
- zvolit správnou strategii **Str** [/]
- tlak výplachu **p** [Ba]
- rychlosti řezání **v** [mm · min⁻¹]

Ale v praxi nám stroj vyhodnotí ty největší možné parametry k obrábění. Při těchto parametrech většinou praská drátová elektroda. Jsme nuceni snížit na takové hodnoty, kde nám drát nebude prskat.

3) Poslední možností je správně zvolená obráběcí technologie ve stroji na daný dílec (součást). V prvopočátku je důležité vytvořit v PEPSU (programovací systém pro drátové řezání) program, kde nakreslíme nebo pomocí modelu dílce vytvoříme figuru. Poté zhotovíme obrábění (dvou osé nebo čtyř osé) a zadáme vhodně zvolené hodnoty (střížná vůle, výška obrobku, materiál – ocel, hliník, tvrdokov).

4.2 Experiment

Experiment byl prováděn na stroji *AgieScharmilles Cut 3000*. Jedná se o porovnání dvou technologií (na čtyři a pět řezů). Požadovaná součást byla upnuta do pracovní části stroje. Nahrál se program do stroje s tvary, které byly řezány. Na první dílec byla použita *technologie se čtyřmi řezy*. Následně se upnul druhý dílec a stejný program, ale zvolila se *technologie na pět řezů*. Po ukončení procesů se řádně zdokumentovaly výsledné hodnoty.

Materiál matric

Střížná matrice byla vyrobena z nástrojové rychlořezné oceli 19830 (1.3339) – ocel s větším důrazem na opotřebení. Patří mezi ocel pro práci za studena.

Vlastnosti:

- vysoká odolnost proti popouštění v kombinaci s vysokou houževnatostí
- značná odolnost proti opotřebení

Použití:

- značně namáhané nástroje k obrábění materiálů střední a vyšší pevnosti
- obrážecí nože na ozubení, frézy, vrtáky a závitníky
- protlačovací a protahovací trny
- střížné nástroje pro práci za studena i za tepla
- ocel je vhodná k povlakování například nitridem titanu

Chemické složení [%] oceli 19830

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W	P	S
0,80- 0,90	0,45	0,45	3,80- 4,60	4,50- 5,50	1,50- 2,20	5,50-7,00	0,035	0,035

Drát AC Brass LP 900

Ve firmě Fortell s.r.o. se používá k řezání mosazný drát (Cu 63% Zn 37%) značky AC BRASS LP 900 o pevnosti v tahu 900 N/mm^2 , průměru 0,25 mm a velikosti cívky 16 kg (označení cívky K200).

Tento drát je vyroben z velmi čisté slitiny pomocí hospodárného výrobního postupu. Doporučuje se pro všechna standardní obrábění, kde je vyžadována dobrá kvalita. Použitelnost drátu pro všechny dostupné elektroerozivní stroje.

4.3 Seznámení se strojem



Obr. 4.3 Foto drátové řezačky AgieCharmilles CUT 3000

Technické parametry stroje:

- přejezdy os x, y, z 500x350x250 mm
- rádius (minimální) 0,1 mm

5. Diskuze k experimentu

Při řezání střížných matric se použije na každou z nich jiná technologie. Na obou matricích je celkem 35 tvarů a k tomu navíc 9 otvorů s úkosem (na vznik fazetky). První dílec řezán na čtyři řezy a druhý na pět řezů. První řez je hrubovací, vytváří tvar, řeže do plného materiálu. Druhý, třetí popřípadě čtvrtý řez se chová jako do hrubovací řez. Poslední je řez na čisto, zhotovuje požadovaný rozměr a povrch. Při nesprávném nastavení parametrů může dojít:

- 1) k přetržení drátu tedy přerušení obrábění, dojde k zastavení stroje
- 2) tvary budou mít špatný rozměr (malý nebo velký).

A tím dojde ke snížení produktivity. Po dokončení obrábění se provede porovnání časů, spotřeba drátu a cenové porovnání.

Značení řezů:

- | | |
|--------|-------|
| 1. řez | Main |
| 2. řez | Trim1 |
| 3. řez | Trim2 |
| 4. řez | Trim3 |
| 5. řez | Trim4 |

5.1 Obrábění na čtyři řezy

Zadané parametry:

	Ofs	P	I	v	Str	p	Fw	Aw
Main	2088	38	17	5,91	133	9,0	17,00	180
Trim1	1471	63	4	5,30	0	0,3	20,00	150
Trim2	1385	71	1	5,04	0	0,3	20,00	135
Trim3	1294	-	3	2,87	0	0,3	20,00	120

Dosahované časy:

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
0:18:36	0:18:36	0:16:48	0:16:48	0:06:36	0:22:48	0:08:24	0:18:36	0:33:36

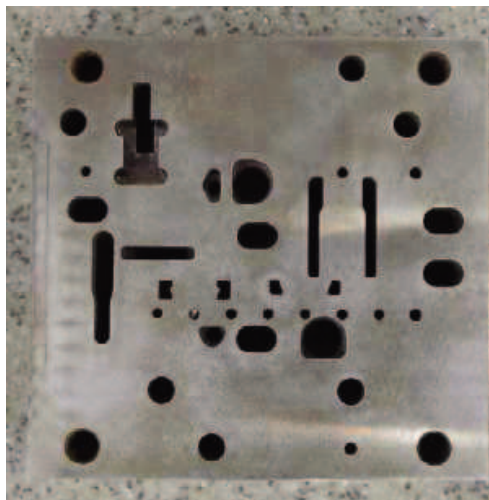
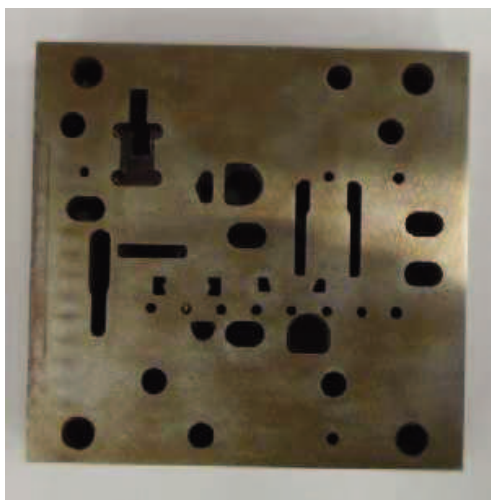
T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
0:16:48	0:06:36	0:26:24	0:06:36	0:16:48	0:06:36	0:06:36	0:10:12	0:16:48

T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
0:06:36	0:06:36	0:18:36	0:06:36	0:24:00	0:06:36	0:16:48	0:06:36	0:05:24

T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34	T35	T36
0:05:24	0:24:00	0:07:12	0:24:00	0:07:12	0:10:48	0:10:48	0:46:48	0:46:48

T37	T38	T39	T40	T41	T42	T43	T44
0:10:48	0:10:48	0:07:12	0:24:00	0:07:12	0:24:00	0:05:24	0:05:24

Výsledný čas: 10 hodin 49 minut 48 sekund



Obr. 5.1 a 5.2 Střížné matrice

5.2 Obrábění na pět řezů

Zadané parametry:

	Ofs	P	I	v	Str	p	Fw	Aw
Main	2128	38	17	5,91	133	9,0	17,00	180
Trim1	1511	63	4	5,30	0	0,3	20,00	150
Trim2	1450	71	3	5,04	0	0,3	20,00	135
Trim3	1334	-	3	2,87	0	0,3	20,00	120
Trim4	1290	-	2	2,20	0	0,3	20,00	105

Dosahované časy:

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
0:28:12	0:28:12	0:25:48	0:25:48	0:09:36	0:34:12	0:12:36	0:28:12	0:50:24

T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
0:25:48	0:09:36	0:39:36	0:09:36	0:25:48	0:09:36	0:09:36	0:15:00	0:25:48

T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
0:09:36	0:09:36	0:28:12	0:09:36	0:36:00	0:09:36	0:25:48	0:09:36	0:08:24

T28	T29	T30	T31	T32	T33	T34	T35	T36
0:08:24	0:36:00	0:10:48	0:36:00	0:10:48	0:16:12	0:16:12	1:10:12	1:10:12

T37	T38	T39	T40	T41	T42	T43	T44
0:16:12	0:16:12	0:10:48	0:36:00	0:10:48	0:36:00	0:08:24	0:08:24

Výsledný čas: 16 hodin 17 minut 24 sekund

5.3 Výpočet (4 řezy)

Potřebné údaje k výpočtu:

▪ na 16 kg cívice	37000 m drátu
▪ cena za 1 kg drátu Brass	190 Kč
▪ průměrná rychlost drátu (v_p)	$4,78 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} = 286,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} = 0,287 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
▪ hodinová sazba řezání	750 Kč
▪ čas	10 h 49 min 48 s = 38 988 s

Délka drátu

$$s = v_p \cdot t$$

$$s = 0,287 \cdot 38\,988$$

$$s = 11\,189,5 \text{ m}$$

Hmotnost 1m drátu

$$m_{1m} = m_{\text{cívka}} / s_{\text{cívka}}$$

$$m_{1m} = 16 / 37000$$

$$m_{1m} = 0,00043 \text{ kg}$$

Hmotnost spotřebovaného drátu

$$m_{\text{spotřeba}} = s \cdot m_{1m}$$

$$m_{\text{spotřeba}} = 11\,189,5 \cdot 0,00043$$

$$m_{\text{spotřeba}} = 4,81 \text{ kg}$$

Cena spotřebovaného drátu

$$d_{\text{spotřeba}} = m_{\text{spotřeba}} \cdot d_{1\text{kg}}$$

$$d_{\text{spotřeba}} = 4,81 \cdot 190$$

$$d_{\text{spotřeba}} = 913,9 \text{ Kč}$$

Zjištěné hodnoty – spotřeba drátu na čtyři řezy činí 4,81 kg v hodnotě 913,9 Kč

5.4 Výpočet (5 řezů)

Potřebné údaje k výpočtu:

▪ na 16 kg cívice	37000 m drátu
▪ cena za 1 kg drátu Brass	190 Kč
▪ průměrná rychlost drátu (v_p)	$4,264 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} = 255,84 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} = 0,256 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
▪ hodinová sazba řezání	750 Kč
▪ čas	16 h 17 min 24 s = 58 644 s

Délka drátu

$$s = v_p \cdot t$$

$$s = 0,256 \cdot 58\,644$$

$$s = 15\,012,9 \text{ m}$$

Hmotnost 1m drátu

$$m_{1m} = m_{\text{cívka}} / s_{\text{cívka}}$$

$$m_{1m} = 16 \cdot 37000$$

$$m_{1m} = 0,00043 \text{ kg}$$

Hmotnost spotřebovaného drátu

$$m_{\text{spotřeba}} = s \cdot m_{1m}$$

$$m_{\text{spotřeba}} = 15\,012,9 \cdot 0,00043$$

$$m_{\text{spotřeba}} = 6,46 \text{ kg}$$

Cena spotřebovaného drátu

$$d_{\text{spotřeba}} = m_{\text{spotřeba}} \cdot d_{1\text{kg}}$$

$$d_{\text{spotřeba}} = 6,46 \cdot 190$$

$$d_{\text{spotřeba}} = 1227,4 \text{ Kč}$$

Zjištěné hodnoty – spotřeba drátu na pět řezů činí 6,46 kg v hodnotě 1227,4 Kč

6. Technicko – ekonomické zhodnocení, závěr

Bakalářská práce byla zhotovena ve společnosti Fortell s.r.o., kde bylo provedeno zadání úkolu a to porovnání dvou obráběcích technologií elektrodrátového řezání na stroji značky AgieScharmilles Cut 3000. Po vyřezání střižné matrice oběma technologiemi, proběhlo následné vyhodnocení a posouzení.

Na základě experimentálního řezání čtyřiceti čtyř tvarů na střižné matrici se došlo k závěru, že při použití technologie na čtyři řezy je spotřeba drátu 4,81 kg. Cena toho množství byla vypočtena na 913,9 Kč. Při takto nastavených parametrech dosáhneme celkového času 10 hodin 49 minut 48 sekund.

Na druhou matrici byla použita technologie na pět řezů a spotřeba drátu vzrostla na 6,46 kg. Cena spotřebovaného drátu činí 1227,4 Kč. Bohužel jak je vidět i čas se radikálně změnil na 16 hodin 17 minut 24 sekund.

Závěrem mohu konstatovat, že produktivnější technologie je na čtyři řezy a tím firma ušetří 313,5 Kč a urychlí výrobu o 5 hodin 27 minut a 36 sekund.

7. Seznam použité literatury

- [1] Řasa, Jaroslav; Kerečaninová, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 19. března 2008, 3, strana 80, [cit. 2012-04-6]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>>.
- [2] Bilík, Oldřich. Obrábění I. Nekonvenční technologie obrábění. 2. díl. Katedra obrábění a montáže. Editační středisko VSB-TU Ostrava, 2002
- [3] Řezání plazmou [online]. © 2008 [cit. 2012-04-6]. Plazma přednosti a nevýhody. Dostupné z WWW: <http://www.plazmacz.cz/>
- [4] Mádl, Jan; Kafka, Jinřich; Vrabec, Martin. Technologie obrábění. Nekonvenční metody obrábění. 3. díl. Vydavatelství ČVUT, Žitná 4, Praha 6, 2000, 88 s.
- [5] Řasa, Jaroslav; Kerečaninová, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 19. července 2007, 7, strana 60, [cit. 2012-04-6]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencnimetody-obrabeni.html>>.
- [6] Vigner, M.; Přikryl, Z. a kolektiv. Obrábění. Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Praha 1, Spálená 51, 1984, 808 s. 04-250-84.
- [7] Řasa, Jaroslav; Kerečaninová, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění - 6. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 11. června 2008, 6, strana 58, [cit. 2012-04-6]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencnimetody-obrabeni-2.html>>.
- [8] Řasa, Jaroslav; Pokorný, Přemysl; Gabriel, Vladimír. Strojírenská technologie 3 - 2. díl, Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění. Nekonvenční metody obrábění. Vydala Scientia, spol. s r.o., pedagogické nakladatelství, Radimova 37/50, 169 00 Praha 6 – Břevnov, 2001, 220 s, 1. vydání. ISBN 80-7183-227-8.

[9] Kocman, Karel. Technologické procesy obrábění, Nekonvenční metody obrábění. Vydalo akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2011, 330 s, 1. vydání. ISBN 978 - 80 - 7204 - 722 - 2.

[10] Fortell s.r.o., [cit. 2012-04-6]. Dostupné z WWW: <http://www.fortell.cz>

[11] Hluchý, Miroslav; Kolouch, Jan. Strojírenská technologie 1 – 1. díl, nauka o materiálu. Vydalo nakladatelství Scentia, s.r.o., Křížova 1018/6, 150 05 Praha 5 – Smíchov, 2007, 266 s, 4. vydání. ISBN 978 – 80 – 86960 – 26 – 5.